

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS CON VISTAS A LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DISTRITOS DE RIEGO

Salgado, R. (P)(1 2), Mateos, L.(2)

¹ Investigador, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Argentina, salgado.ramiro@inta.gob.ar

² Investigador, Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Alameda del Obispo, Córdoba, España, luciano.mateos@ias.csic.es

Resumen

Se compararon y evaluaron métodos de cálculo de evapotranspiración de los cultivos (ET_c): con el programa CROPWAT ($ET_{CROPWAT}$); derivada de los índices de vegetación (IV) de imágenes de los satélites Landsat 7 y 8 aplicando un modelo de balance de agua en el suelo para condiciones óptimas (ET_{IV}^{OPT}) y según el programa real de riego (ET_{IV}^{Real}), y obtenida del balance de energía sobre la superficie de los cultivos de la aplicación EEFlux (ET_{EEFlux}), todo con vistas al cálculo de indicadores de desempeño de riego. $ET_{CROPWAT}$ y ET_{IV}^{OPT} se calcularon en dos subsistemas, El ALTO y APAZ-IV, del Sistema de Riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina, entre julio de 2014 y junio de 2015. Sobre una selección de parcelas de algodón (24) y maíz (7) en APAZ-IV de las que se conocía el calendario de riegos se comparó ET_{IV}^{OPT} con ET_{IV}^{Real} y se contrastaron valores diarios de ET_{EEFlux} con ET_{IV}^{OPT} y ET_{IV}^{Real} para las fechas de paso de los satélites. Para El ALTO, $ET_{CROPWAT}$ fue 1146 mm y ET_{IV}^{OPT} fue 851 mm. Para APAZ-IV $ET_{CROPWAT}$ fue 1187 mm y ET_{IV}^{OPT} 809 mm. Para las parcelas de algodón, la ET_{IV}^{OPT} fue 637 mm y ET_{IV}^{Real} 642 mm, y para las de maíz ET_{IV}^{OPT} fue 597 mm y ET_{IV}^{Real} 562 mm. La relación ET_{EEFlux} y ET_{IV}^{Real} presentó un $R^2 = 0.81$ y la dispersión puede deberse a las condiciones locales del cultivo, variabilidad espacial de las lluvias, las fuentes de información meteorológica o la definición de algún parámetro de suelo/cultivo. La ET_{IV}^{OPT} no refleja la práctica del riego de pre-siembra y si ET_{EEFlux} . Utilizar CROPWAT para el análisis del desempeño de grandes áreas bajo riego conlleva desviaciones en los resultados de los indicadores de desempeño con respecto a la realidad. Los otros métodos se presentan como alternativas prometedoras pero requieren un mayor volumen de información.

1- Introducción

La evaluación del desempeño de un sistema de riego es una tarea compleja y está influenciada por numerosas variables como el clima, diseño del sistema, gestión, operación y su entramado socio-económico (Molden et al., 1998). Si se dispone de los registros de uso del agua para parcelas individuales, puede ser posible caracterizar la variabilidad que existe en el manejo del riego entre los agricultores en función del tipo de suelo, cultivos, ubicación dentro del sistema de riego, tamaño de la explotación, experiencia del agricultor, etc., debido a que son factores de gran importancia que influyen en el rendimiento del riego dentro de un área (Lorite et al., 2004).

El principal componente del balance de agua en sistemas agrícolas semiáridos de regadío es la evapotranspiración de los cultivos (ET_c). El método más común para estimar ET es el propuesto por el manual FAO-56 (Allen et al., 1998).

CROPWAT ha sido utilizado ampliamente para calcular ET_c y los requerimientos regionales de riego de los cultivos, utilizando variables meteorológicas, de suelo y cultivo basado en los coeficientes de cultivo (K_c). Una de las limitantes es que rara vez coincide con la realidad debido a diversas razones agronómicas, económicas y de recursos hídricos por las incertidumbre sobre si las condiciones vegetativas y de crecimiento reales se relacionan con las condiciones representadas por los valores de K_c idealizados (Díaz et al., 2007).

Una alternativa para estimar ET_c es a través del método de coeficiente de cultivo dual que permite, a diferencia del K_c , predecir los efectos de los eventos individuales de humedecimiento del suelo basado en la separación de la contribución respectiva de la transpiración de la planta (K_{cb}) y la evaporación del suelo (K_e). Pero los K_{cb} proporcionados por el manual FAO-56 presentan los mismos inconvenientes que cuando se utiliza K_c . Por ello, una alternativa es derivar los perfiles temporales de K_{cb} a través de la teledetección por su relación directa con la respuesta espectral de la cubierta vegetal, especialmente con los índices de vegetación (IV) (Allen & Pereira, 2009; Glenn et al., 2008; González-Dugo et al., 2009; Mateos et al., 2013). El K_e está vinculado a la fracción de suelo desnudo, complementaria de la fracción de cubierta vegetal (f_c), y puede estar relacionada con los IV de manera lineal, o aproximadamente lineal, en el rango desde el suelo desnudo hasta la cobertura del suelo casi completa (Huete et al., 1985; Bannari et al., 1995).

También, existe la posibilidad de calcular ET_c con el uso de sensores remotos como un residuo del balance de energía de la superficie terrestre derivada de las imágenes de banda térmica proveniente de los satélites como Landsat 7 y Landsat 8, conocido como Mapeo de la Evapotranspiración a Alta Resolución con Calibración Internalizada (METRIC) (Allen et al., 2007a). Estos valores de ET_c son diarios, sujetos a las fechas de paso de los satélites y se encuentran de manera gratuita en aplicaciones como Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) de Google, Inc (Allen et al., 2015).

La estimación de indicadores de rendimiento de riego y la evaluación del desempeño de grandes áreas irrigadas a través de teledetección ha tomado relevancia en los últimos tiempos debido a sus ventajas económicas y físicas (González-Dugo et al., 2013; Akdim et al., 2014; Saadi et al., 2015). Esto permite evaluar de manera realista el potencial de mejora en la gestión del riego, basado en la variabilidad en el desempeño del riego entre los agricultores. Esto solo es posible si se dispone de la información a nivel de sistema de riego y campo individual, lo que implica un esfuerzo considerable en la adquisición de datos a diferentes escalas.

2- Objetivo

Comparar y evaluar diferentes métodos de cálculo de ET_c con vistas al cálculo de indicadores de desempeño de riego.

3- Área de estudio

Se seleccionaron dos subsistemas de riego dentro del Sistema de Riego de Río Dulce (SRRD) de la provincia de Santiago del Estero, Argentina, El ALTO y APAZ-IV (Figura 1). El clima del área es semiárido, con una precipitación anual promedio de 608 mm. Los suelos presentan escaso desarrollo edafológico, textura franco-limosa a franco-arenosa, valores promedio de agua disponible total (ADT) en el primer metro de profundidad de 150 mm a 180 mm y bajo contenido de materia orgánica y nitrógeno total sin presencia de capa freática en la profundidad de desarrollo de las raíces de los cultivos (Angueira y Zamora,

2007; Galizzi et al., 2015). Los cultivos principales son algodón y alfalfa, en menor proporción maíz, soja, trigo, avena y hortalizas (cebolla, melón y sandía). El método habitual de riego es por superficie o manto con una eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución (*UD*) de alrededor del 70% (Angella et al., 2011).

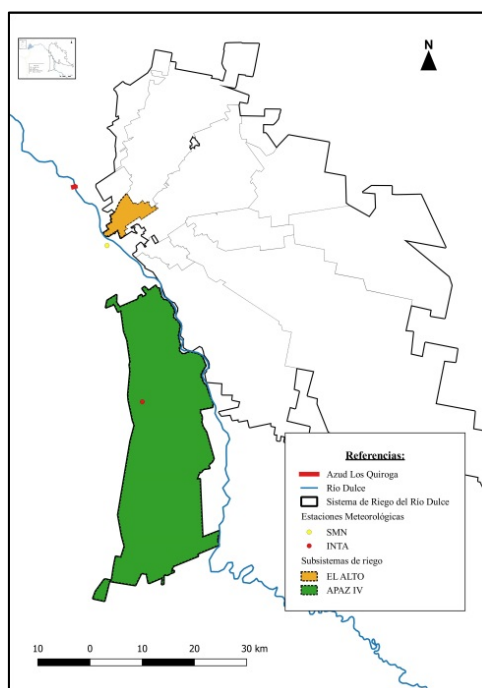


Figura 1. Localización de los subsistemas de riego seleccionados y las dos estaciones meteorológicas utilizadas para el estudio dentro SRRD (SMN – Servicio Meteorológico Nacional; INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria).

4- Materiales y Métodos

A - Cálculo de ET a través del programa CROPWAT

CROPWAT (Versión 8.0, 2009), permite el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos ($ET_{CROPWAT}$) basado en el K_c de un cultivo en condiciones estándar descritas por el manual FAO-56 que se desarrolla en campos extensos, bajo condiciones agronómicas óptimas y sin limitaciones de humedad en el suelo. Este programa es recomendado para estudios a nivel de planificación y para el diseño de sistemas de riego donde sea razonable y pertinente considerar los efectos promedios del humedecimiento del suelo debido a la dificultad de introducir la información real de cada unidad de riego que componen un distrito.

$$ET_{CROPWAT} = K_c \times ET_o \quad (1)$$

donde CROPWAT calcula la ET_o diaria utilizando variables meteorológicas. Los valores de K_c corresponden a las fases inicial, media y final del crecimiento del cultivo. También requiere de la fecha de siembra, duración de las fases de crecimiento, profundidad efectiva de la raíz durante la etapa inicial del crecimiento ($Z_{r\ min}$), la profundidad máxima efectiva ($Z_{r\ max}$) y la fracción de agotamiento crítico (p) expresada como una fracción ADT . El balance hídrico del suelo considera todos los ingresos y pérdidas de agua en la zona radicular durante un determinado periodo de acuerdo a:

$$D_{ri} = D_{ri-1} + ET_{CROPWAT\ i} - PP_i - I_{ri} + (ES_i + P_i) \quad (2)$$

donde D_{ri} es el agotamiento de humedad en la zona radicular al final del día i , D_{ri-1} el contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior $i-1$, PP_i la precipitación en el día i , ES_i el escurrimiento superficial en el día i , I_i lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo, $ET_{CROPWAT\ i}$ en el día i y P_i las pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i .

B - ET derivada de Índices De Vegetación

Los IV son transformaciones de dos o más bandas espectrales y representan propiedades de los cultivos como la f_c , el índice de área foliar y la arquitectura de dosel de las plantas (Glenn et al., 2008). Para estimar la evapotranspiración de los cultivos (ET_{IV}) se utiliza el modelo dual de K_c :

$$ET_{IV} = (K_{cb} K_s + K_e) ET_o, \quad (3)$$

donde K_s cuantifica la reducción en la transpiración del cultivo debido al déficit hídrico del suelo y K_e es el coeficiente de evaporación del suelo. El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. El modelo utiliza los IV de las diferentes fechas de paso de los satélites para estimar el coeficiente de cultivo basal real ($K_{cb\ IV}$) basado en la relación lineal entre la f_c derivada a partir de un IV para calcular $K_{cb\ IV}$ (González-Dugo y Mateos, 2008). Por lo tanto:

$$K_{cb\ IV} = \frac{K_{cb\ IV\ max}}{f_{c\ max}} \left[\frac{(IV - IV_{min})}{(IV_{max} - IV_{min})} \right] \quad \text{Si } f_c < f_{c\ max}, \quad (4.a)$$

$$K_{cb\ IV} = K_{cb\ IV\ max} \quad \text{Si } f_c \geq f_{c\ max}. \quad (4.b)$$

El IV considerado fue el "Normalized Difference Vegetation Index" ($NDVI$) (Rouse et al., 1974), obtenido de la relación entre las bandas de infrarrojo cercano y rojo de los satélites Landstat. La relación entre el $NDVI$ y la f_c es la siguiente:

$$f_c = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}, \quad (5)$$

donde $NDVI_{min}$ es el $NDVI$ mínimo y $NDVI_{max}$ el $NDVI$ máximo, para $f_c = 0$ y $f_c = 1$, respectivamente. La profundidad de la zona raíz (Z_r) se calcula como una función de $K_{cb\ IV}$ según la duración de las fases inicial, de desarrollo rápido, pleno desarrollo y final de cada cultivo. El K_e se obtiene calculando la cantidad de energía disponible al nivel de la superficie del suelo, y depende de la reducción de la evaporación relacionada con la cantidad de agua fácilmente evaporable en el horizonte superficial. El coeficiente de estrés (K_s) entra en juego cuando se supera el valor p y la transpiración del cultivo se reduce. La lámina de riego a aplicar está determinada por el déficit de agua en el suelo y la estrategia de riego, expresada como la lámina de riego necesaria para llevar Z_r a capacidad de campo. La escorrentía superficial se calculó con el método del número de curva SCS utilizando

registros de lluvia diarios Soil Conservation Service (SCS, 1972; NRCS, 2004). Se incluyeron ajustes para expresar los efectos sobre la escorrentía de la pendiente y las condiciones de humedad del suelo (Williams 1991). La percolación profunda debida al riego está relacionada con la UD .

C - ET a través del Balance de Energía en la Superficie Terrestre - METRIC-EEFlux

La aplicación EEFlux utiliza imágenes de los satélites Landsat para calcular la evapotranspiración a una escala de 60 m como un residuo del balance de energía en la superficie de la Tierra basado en los principios y técnicas del modelo SEBAL que divide la energía disponible utilizando la temperatura de la superficie radiométrica (T_R), derivada de las imágenes de banda térmica, para restringir el flujo de calor sensible, calculando el calor latente como un residuo del balance de energía de la superficie (Bastiaanssen et al., 1998a y b). Calibrado automáticamente para cada imagen, el diseño de la aplicación EEFlux se basa en el modelo ampliamente evaluado METRIC y ofrece mapas de evapotranspiración para cualquier escena de Landsat 5, 7 u 8 (Foolad et al., 2018). EEFlux emplea los algoritmos primarios de METRIC que conducen a un balance de energía completo en la superficie terrestre y calculan la energía térmica latente (LE , $W m^{-2}$) en una base de píxel por píxel como un residuo de la ecuación del balance de energía de la superficie como:

$$LE = R_n - G - H \quad (6)$$

donde LE , es la energía utilizada por el agua en su cambio de fase de líquido a gas durante el proceso de evapotranspiración, R_n es la densidad de flujo de radiación neta ($W m^{-2}$); G es la densidad de flujo de calor del suelo ($W m^{-2}$) que representa el calor sensible conducido hacia el suelo y H es la densidad de flujo de calor sensible ($W m^{-2}$) convectada en el aire que puede estimarse utilizando la ecuación de resistencia aerodinámica en masa:

$$H = \rho C_p (dT/r_{AH}) \quad (7)$$

donde ρ es la densidad del aire ($kg m^{-3}$), C_p es el calor específico del aire ($1005 J kg^{-1} K^{-1}$), dT (K) es el gradiente de temperatura entre dos alturas sobre la superficie, z_1 y z_2 (m), y r_{AH} ($s m^{-1}$) es la resistencia aerodinámica al transporte turbulento entre z_1 y z_2 . Bastiaanssen et al. (1998a) suponen que el gradiente de temperatura se puede aproximar mediante una relación lineal de la temperatura de la superficie:

$$dT = a + b T_R \quad (8)$$

donde a y b son parámetros empíricos y se determinan por medio de una calibración basada en la selección del píxel "caliente", que debe ser suelo desnudo y seco por lo que $LE = 0$ y $H = R_n - G$, y el píxel frío, que debe ser un cultivo bien regado a plena cobertura donde se supone que LE es 5% superior a la evapotranspiración de referencia de alfalfa (ET_r) dentro de la escena del satélite (Allen et al., 2007b). Luego, se calcula la evapotranspiración instantánea (ET_{inst}) dividiendo LE de cada píxel por el calor latente de vaporización. Para extrapolar evapotranspiración instantánea al período de 24 horas (ET_{EEFlux}), la ET_{inst} se divide por la ET_r diaria calculada a partir de datos meteorológicos reticulados de diferentes plataformas (Foolad et al., 2018). Este cálculo prescinde de la clasificación de cultivos para generar la ET_{EEFlux} de un área.

D - Recopilación de datos

El cálculo de $ET_{CROPWAT}$, ET_{IV} bajo un programa óptimo riego se llevó a cabo para la temporada de riego comprendida entre julio de 2014 y junio de 2015 (14_15) en los subsistemas de riego El ALTO y APAZ_IV del SRRD.

Las variables meteorológicas y la información de precipitación diaria se obtuvieron de las estaciones meteorológicas del SMN y del INTA para El ALTO y APAZ_IV, respectivamente. La información de los cultivos de cada unidad de riego en la 14_15 fue proporcionada por las gerencias y, a través de las imágenes de Google Earth, se verificó la información aportada, junto con inspecciones dirigidas sobre terreno y consultas a los agricultores. La información geográfica se obtuvo a través de un archivo vectorial de polígonos con la delimitación de cada unidad e información básica que fue proporcionado por la Unidad Ejecutora del Servicio de Riego del Río Dulce. Con el software QGIS se extrajeron los polígonos que disfrutaron de turnados de riego en la 14_15. Luego se recortaron según los cultivos y eliminaron las borduras que pudieran contaminar la información de los píxeles de las imágenes satelitales utilizadas (camino, canales, cortinas de árboles, etc.). Se obtuvieron para El ALTO 160 subunidades y en APAZ-IV 1723. Los parámetros culturales de cada cultivo, suelo y riego necesarios para el cálculo de la ET_c por cada método se presentan en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1. Parámetros de riego de cada cultivo utilizados para calcular $ET_{CROPWAT}$ y ET_{IV} .

Parámetro	Alfalfa	Algodón	Maíz ₁	Maíz ₂	Soja	Cebolla	Melón	Sandía	Avena
p	0.55	0.65	0.50	0.50	0.50	0.30	0.45	0.40	0.55
Z_r (m)	2,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0

p : fracción agotamiento crítico; Z_r : Profundidad máxima enraizamiento; Maíz₁: maíz sembrado en verano; Maíz₂: maíz sembrado en primavera.

Tabla 2. Parámetros de suelo de los suelos y riego para calcular $ET_{CROPWAT}$ y ET_{IV} .

Parámetros	
Capacidad de Campo (mm/m)	270
Punto de Marchitez Permanente (mm/m)	93
Número de Curva	71
Pendiente (m/m)	0.001
Evaporación en la primera fase de evaporación (mm)	10
Déficit inicio del balance (mm)	108
Humedad total del suelo disponible (mm/m)	180
Tasa máxima de infiltración de lluvia (mm/día)	40
Agotamiento inicial de agua del suelo (%)	60
Agua disponible inicial del suelo (mm/m)	72

Para el cálculo de ET_{IV} se seleccionaron 17 imágenes para El ALTO y 38 imágenes para APAZ_IV de $NDVI$ de los satélites Landsat 7 (*Path/Row* 229/80, 230/79 y 230/80) y Landsat 8 (*Path/Row* 229/80 y 230/79) de la aplicación EEFlux. Las imágenes se reproyectaron, se fusionaron aquellas imágenes de una misma fecha y luego se recortaron sobre el área de estudio con QGIS. Luego, se extrajeron los valores de $NDVI$ medio para cada fecha y subunidad de riego.

E - ET EEF_{lux} vs ET derivada de índices de vegetación

Para evaluar ET_{EEFlux} , se contrastaron los resultados con los de ET_{IV} obtenida de parcelas agrícolas en condiciones reales de riego. Para ello, se seleccionaron 31 subunidades del área de influencia de APAZ-IV con maíz sembrado en verano (7) y algodón (24) en la 14_15. Se recortaron los polígonos para eliminar las borduras. También se contó con la información de fechas de riego y siembra de cada parcela. Se procedió a la estimación de la ET_{IV} utilizando los parámetros culturales y de riego de la Tabla 1 y 2 para un óptimo programa de riego (ET_{IV}^{OPT}) y la situación real dada (ET_{IV}^{REAL}).

5- Resultados y Discusión

Los resultados de CROPWAT distinguen entre tipos de cultivo pero no entre parcelas. Además, CROPWAT supone que el desarrollo de los cultivos es “prístino”. De ahí que $ET_{CROPWAT}$ es notablemente mayor que ET_{IV}^{OPT} , que por otro lado sí detecta la variabilidad entre las parcelas y los estados de crecimiento distintos del prístino (Tabla 3). Las ventajas de CROPWAT residen en la necesidad de menor información como insumo en relación con el modelo de balance de agua del suelo a través del IV, convirtiéndolo en una herramienta ágil y de fácil manejo para el usuario.

Tabla 3. $ET_{CROPWAT}$ y ET_{IV}^{OPT} para EI ALTO y APAZ-IV.

Subsistema	$ET_{CROPWAT}$ (mm)	ET_{IV}^{OPT} (mm)
EI ALTO	1146	851
APAZ-IV	1187	809

Tabla 4. ET_{IV}^{OPT} y ET_{IV}^{REAL} para las 31 parcelas de maíz y algodón seleccionadas. Entre paréntesis la desviación estándar.

Cultivo	ET_{IV}^{OPT} (mm)	ET_{IV}^{REAL} (mm)
Algodón	637 (60)	642 (58)
Maíz	597 (22)	562 (39)

Si se cuenta con información de los eventos de I y PP e imágenes satelitales con cierta periodicidad libres de nubes, la estimación de ET_{IV} para un óptimo programa de riego y las condiciones reales de campo serían las más adecuada en relación a CROPWAT, captando la variabilidad entre agricultores y la gestión del riego a un nivel de detalle mayor (Mateos et al., 2013; González-Dugo et al., 2013).

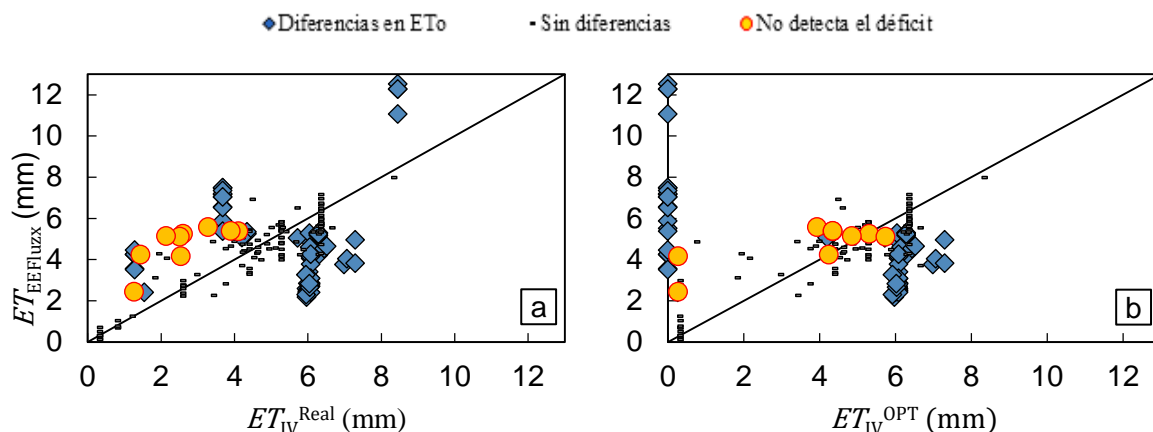


Figura 2. a) ET_{EEFlux} en relación a la ET_{IV}^{Real} y b) ET_{EEFlux} en relación a la ET_{IV}^{OPT} para las 31 parcelas seleccionadas de algodón y maíz.

La relación entre ET_{EEFlux} y ET_{IV}^{Real} se encuentra razonablemente cerca de la recta 1:1 ($R^2 = 0.81$) (Figura 2a). La dispersión puede deberse a que el modelo de balance de agua del suelo no representa adecuadamente las condiciones locales del cultivo, por la variabilidad espacial de las lluvias, las fuentes de información meteorológicas o la definición de algún parámetro de suelo/cultivo. La ET_{IV}^{OPT} no refleja a la práctica real del riego pre-siembra que es detectado por la ET_{EEFlux} (Figura. 2b). ET_{EEFlux} no detecta con precisión el déficit de agua en el suelo que pueda llegar a provocar una reducción en la ET real de los cultivos, algo que destacaron como fortaleza varios autores en diferentes publicaciones (Allen et al., 2007a y b; Foolad et al., 2018). Pero, las ventajas encontradas de esta aplicación en este trabajo residen en la detección de eventos de riego próximos al paso del satélite, donde la influencia de la evaporación del suelo es mayor en la ET .

6- Conclusiones

CROPWAT sobreestima la ET_c en relación a los valores derivados de los IV en condiciones óptimas de riego, ocultando la realidad de las parcelas dentro de los subsistemas analizados. Los IV permiten captar adecuadamente la variabilidad de los cultivos en el área sujeto a un nivel de información y conocimiento detallado que requiere de tiempo y recursos. La ET_{EEFlux} representa un valor puntual de la fecha de paso de un satélite y pueden diferir de la realidad debido al origen de los valores de ET_0 que utiliza o porque el cultivo atraviesa un déficit de agua en el suelo y no es adecuadamente detectado. Por lo tanto, cuando se usa CROPWAT para el análisis del desempeño de grandes áreas bajo riego hay que ser consciente de las desviaciones de los indicadores de desempeño con respecto a la realidad. Los otros métodos se presentan como alternativas prometedoras pero requieren un mayor volumen de información.

7- Bibliografía

Akdin, N., Alfieri, S. M., Habib, A., Choukri, A., Cheruiyot, E., Labbassi, K., & Menenti, M. (2014). Monitoring of irrigation schemes by remote sensing: Phenology versus retrieval of biophysical variables. *Remote Sensing*, 6(6), 5815-5851.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao*, Rome, 300(9), D05109.

Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007a). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 380-394.

Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., ... & Robison, C. W. (2007b). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 395-406.

Allen, R. G., & Pereira, L. S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, 28(1), 17-34.

Allen, R. G., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I. & Robison, C. (2015). EEFlux: A Landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In 2015 ASABE/IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation-A Tribute to the Career of Terry Howell, Sr. Conference Proceedings (pp. 1-11). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Angella, G., Prieto, D., Salgado, R., Salvatierra, J., Wintten, C., Coronel Lozano, A., Sarria, C. & Ybarra, R. (2011). La evaluación del desempeño de los sistemas de riego como una herramienta para la mejora de su gestión. In XXIII Congreso Nacional del Agua. ISSN (1853-7685).

Angueira, C., & Zamora, E. (2003). Oeste del área de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Ed. INTA. ISSN 1850 4086. Serie informes técnicos EEASE N°40.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, 13(1-2), 95-120.

Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.

Bastiaanssen, W. G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & Van der Wal, T. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): II: Validation. *Journal of hydrology*, 212, 213-229.

Diaz, J. R., Weatherhead, E. K., Knox, J. W., & Camacho, E. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 7(3), 149-159.

Foolad, F., Blankenau, P., Kilic, A., Allen, R. G., Huntington, J. L., Erickson, T. A., Ozturk, D., Morton, C. G., Ortega, S., Ratcliffe, I., Franz, T. E., Thau, D., Moore, R., Gorelick, N., Kamble, B., Revell, P., Trezza, R., Zhao, W. & Robison, C. W. (2018). Comparison of the Automatically Calibrated Google Evapotranspiration Application—EEFlux and the Manually Calibrated METRIC Application. doi: 10.20944/preprints201807.0040.v1

Galizzi, F., González, C., Nazar, P., Elias Tissera, N. J., Ramírez, N. M., & Gómez, N. A. (2015). Condición inicial de un suelo degradado por el uso agrícola continuado en la zona IV de riego del Río Dulce (Provincia de Santiago del Estero). X Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. Salta 21 al 22 de mayo de 2015.

Glenn, E., Huete, A., Nagler, P., & Nelson, S. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: What vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136-2160.

González-Dugo, M. P., & Mateos, L. (2008). Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural water management*, 95(1), 48-58.

Gonzalez-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., & Li, F. (2009). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11), 1843-1853.

González-Dugo, M. P., Escuin, S., Cano, F., Cifuentes, V., Padilla, F. L. M., Tirado, J. L., Oyonarte, N., Fernández, P. & Mateos, L. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agricultural water management*, 125, 92-104.

Huete, A. R., Jackson, R. D., & Post, D. F. (1985). Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote sensing of environment*, 17(1), 37-53.

Lorite, I.J., Mateos, L. & Fereres, E. (2004). Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment II. Variability among crops and farmers. *Irrigation Science*, 23(2), 85-92.

Mateos, L., González-Dugo, M. P., Testi, L., & Villalobos, F. J. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural water management*, 125, 81-91.

Molden, D. J., Sakthivadivel, R., Perry, C. J., & De Fraiture, C. (1998). Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems (Vol. 20). IWMI.

NRCS (2004). Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook*, Chapter 10. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W. & Sehell, J. A., (1974): Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.

SCS, (1972). Section 4: Hidrology. *National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture

Saadi, S., Simonneaux, V., Boulet, G., Raimbault, B., Mougenot, B., Fanise, P., Ayari, H. & Lili-Chabaane, Z. (2015). Monitoring irrigation consumption using high resolution NDVI image time series: Calibration and validation in the Kairouan Plain (Tunisia). *Remote Sensing*, 7(10), 13005-13028.

Williams, J. R. (1991). Runoff and water erosion. In: Hanks J, Ritchie JT (eds) *Modeling plant and soil systems*. ASA/CSSA/SSSA, Madison, Wis., pp 439-455